

辽东半岛南部卧龙古风化壳磁化率分析

段一明^{1*}, 张 戈^{1,2}

¹辽宁师范大学, 辽宁 大连

²黑龙江科技大学, 黑龙江 哈尔滨

Email: *1429808753@qq.com

收稿日期: 2021年3月1日; 录用日期: 2021年3月17日; 发布日期: 2021年3月29日

摘 要

以辽东半岛南部卧龙古风化壳剖面为研究对象, 分析其磁化率变化特征曲线, 并与粒度特征结合分析, 初步探讨辽东半岛南部的沉积环境及其古气候变化信息, 研究结果表明: 卧龙剖面磁化率曲线整体呈现出波动变化的趋势, 频率磁化率百分数曲线从剖面顶部至底部呈现出波动减小的趋势, 低频磁化率平均值为 $13.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 百分比频率磁化率平均值为5.4%; 粒度分析表明磁性矿物可能主要富集于2~63 μm 的粉砂组分中; 卧龙剖面磁学参数的变化特征在一定程度上可以反映古气候信息, 但能否作为恢复古气候的替代指标, 还需深入研究。

关键词

环境磁学, 粒度, 古气候, 辽东半岛

Characteristic of Magnetic Susceptibility and Its Primarily Interpretation of Weathering Crust in Liaodong Peninsula

Yiming Duan^{1*}, Ge Zhang^{1,2}

¹Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

²Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang

Email: *1429808753@qq.com

Received: Mar. 1st, 2021; accepted: Mar. 17th, 2021; published: Mar. 29th, 2021

*通讯作者。

Abstract

In this paper, Wolong section as object, analyzing the changes of magnetic susceptibility characteristic curve, and combined with particle size characteristics analysis, the preliminary discussion of the Liaodong peninsula, sedimentary environment and ancient climate change information, the results show that magnetic susceptibility curve Wolong profile overall present a fluctuation change trend, the percentage of frequency magnetic susceptibility curve from the top section to appear at the bottom of the wave decreases, low frequency magnetic susceptibility averaged $13.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}^{-1}$, the average frequency of magnetic susceptibility percentage is 5.4%; Particle size analysis shows that magnetic minerals may be mainly concentrated in the silty components of 2~63 μm . The variation characteristics of magnetic parameters of Wolong section can reflect the palaeoclimate information to some extent. Whether it can be used as a substitute index for the recovery of palaeoclimate needs further study.

Keywords

Magnetic Susceptibility, Grain-Size, Liaodong Peninsula, Palaeoclimatic Significance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁性矿物的形成、搬运、沉积和改造与气候以及环境演化密切相关。因此, 沉积物的磁性可以作为环境和气候演变过程的有效替代指标[1]。磁化率是一种衡量物质被磁化难易程度的指标, 其大小取决于样品中磁性矿物含量、组成(粒度和形状)以及温度的变化, 广泛应用于古气候演变[2] [3] [4] [5]、地层划分对比[6] [7]、环境变化[8] [9]等研究领域。沉积物的磁学性质与物源及其赋存环境密切相关, 因此可以根据沉积物所体现出来的磁学性质差异来反演其沉积环境。黄土 - 古土壤磁化率作为反演古气候演化的物理参数在中亚、欧洲和北美等地得到证实后, 被广泛用于海陆气候对比和定量重建古气候[1] [10] [11] [12] [13] [14]。但是有研究发现, 对于不同的沉积物磁化率的古环境意义不尽相同[15] [16] [17], 能否将磁化率作为反演古环境的代用指标尚无定论。本文以卧龙剖面为研究对象, 通过磁化率指标, 沉积物粒度等的综合对比, 探讨磁化率对辽东半岛南部古气候环境有无指示意义, 进而为辽东半岛的古气候演变及古环境变迁提供依据。

磁化率在卧龙剖面形成演化过程中是如何反应古气候的发展变化的, 对古气候环境有无指示意义均应结合反应古气候的其他指标如粒度、孢粉等特征进行综合分析。沉积物的粒度分析在沉积环境以及物源领域占有举足轻重的地位[18], 本文在充分了解研究区的地质概况基础上, 对卧龙剖面进行磁化率以及粒度分析, 探讨剖面在形成过程中磁化率与粒度的关系, 研究其对古气候环境的意义。

2. 研究区概况

辽东半岛是胶辽隆起的一部分, 由震旦系石英岩、砂质灰岩、片岩、片麻岩及一些古生代地层组成。大断裂控制东西两侧, 是郯庐断裂带及其形成的断陷区。离石黄土堆积前, 辽东半岛常处于湿热的陆地环境, 并经受长时期的侵蚀夷平, 形成了面积广大的准平原, 震旦、寒武系地层直接出露地表, 或埋藏

于第三系及第四系松散堆积物之下。第三纪晚期, 辽东半岛的灰岩分布区上发育了厚层红色风化壳, 在风化壳的下部埋藏有规模大小不等的石芽。研究区位置及采样点见图 1。

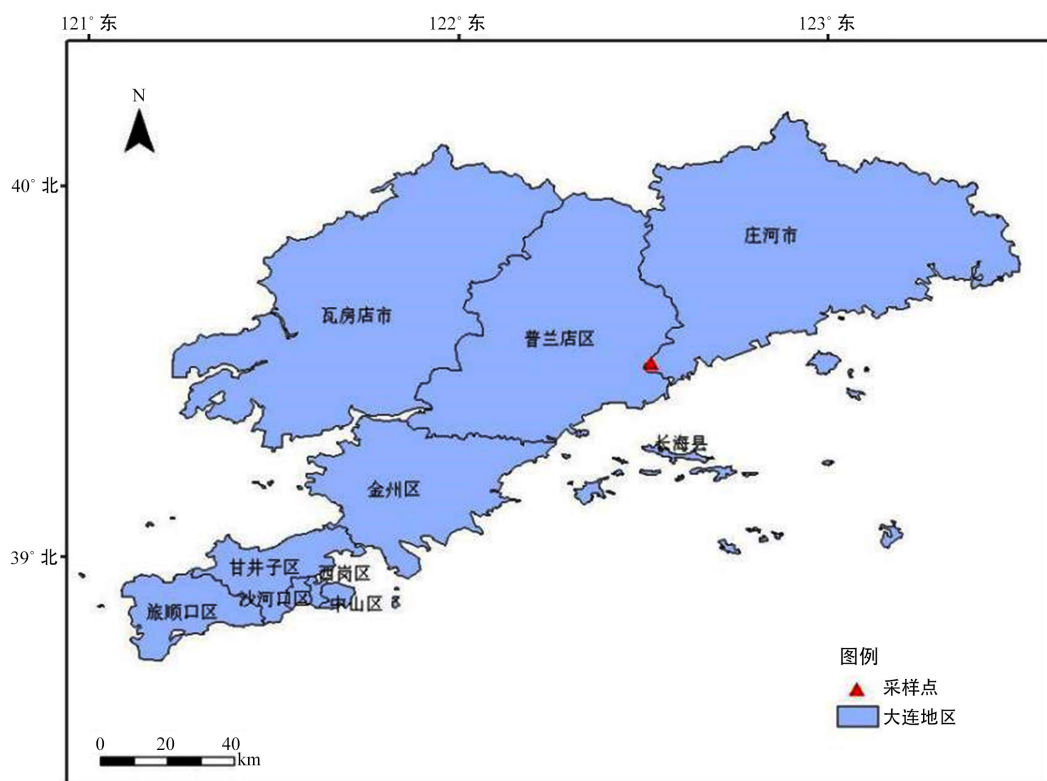


Figure 1. Location map

图 1. 研究区位置图

3. 样品采集及实验方法

古风化壳通常与古夷平面相伴而生, 是古夷平面的重要组成部分[19] [20] [21]。结合已有资料及研究结果, 辽东半岛存在多级夷平面[22]。课题组在室内搜集阅读古夷平面文献 156 篇(通过知网、万方、图书馆、期刊资料室等多种途径获得)、辽宁省区域地质志 1 本、庄河市区域调查报告 5 份, 初步确定于庄河地区进行样品采集。本次研究对象为红色古风化壳, 故在野外勘察过程中重点勘察有红色古风化壳出露的地区。自 2019 年 10 月 16 日起在庄河地区进行野外实地考察, 先后共计 6 次, 累积 25 人次, 经过对庄河地区地质地貌特征野外勘察以及现场对比后最终确定卧龙剖面(见图 1)。

卧龙剖面位于辽宁省庄河市, 经纬度为 $122^{\circ}31'13.8''E$, $39^{\circ}31'32.22''N$ 。露头为 1.5 米, 颜色呈红棕色, 质地密实, 未见层理。从露头处可以看到明显的分层, 中间层是砾石层, 大约为 0.3 米。地表至砾石层顶部为 0.6 米, 砾石层底部至地面为 0.6 米。考虑到扰动的因素, 从砾石层底部清理剖面, 去除表层土体, 向下清理出 1 米的剖面, 未见基岩。第一次采样, 将 1 米的剖面按 20 厘米为间隔取样(在野外观察到剖面的颜色、粒度等变化不明显, 故以 20 cm 间隔取样), 共取 5 个样品, 从上到下, 标号为 Q5~Q1(见图 2)。第二次在卧龙剖面的相同位置处, 清理掉表土层, 利用钻机打钻的方式, 向下打钻 1.9 米, 以 10 厘米为间隔取出样品(观察到样品的颜色、粒度等随着深度变化较为显著, 故以 10 cm 为间隔取样), 共取得 19 个样品。从上到下标号为 WL1~WL19。WL1~WL11 号样品颜色呈红棕色, 质地紧密, WL12~WL19 号样品颜色偏黄棕色, 质地较为松散(见图 2)。



Figure 2. Location and sampling of the Wolong paleoweathering crust

图 2. 卧龙古风化壳采样情况

实验步骤如下:

1) 将样品装在容积为 1 cm^3 的磁学样品专用塑料盒中, 装满压实, 称其质量, 求出平均密度; 2) 用 MS-2 型磁化率测量系统(英国 Bartington 公司生产)分别测定每一样品的容积磁化率 K_{lf} (低频)、 K_{hf} (高频), 测量三次取平均值; 3) 计算样品的质量磁化率 χ ($10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$)与频率磁化率 χ_{fd} 。

计算公式[23]如下:

$$\chi = K/\rho \tag{1}$$

$$\chi_{fd} \% = \frac{K_{lf} - K_{hf}}{K_{lf}} \times 100 \tag{2}$$

式中: ρ 为样品的平均密度, $\rho = w/v$, 单位为 kg/cm^3 ; K 为容积磁化率, K_{lf} 表示 0.46 kHz 下的容积磁化率, K_{hf} 表示 4.6 kHz 下的容积磁化率; χ 表示质量磁化率, χ_{lf} 表示低频质量磁化率, χ_{hf} 表示高频质量磁化率, χ_{fd} 为频率磁化率。

磁化率在测量过程中受周围环境影响较大, 故在实验过程中远离金属物品, 保证实验结果的准确性, 另外所有样品在测量 K_{lf} 与 K_{hf} 时均测量 3 次, 经背景值修正后取其平均值, 并且在测量样品质量时也是在电子天平上测量三次取其平均值, 以保证测量结果准确。

4. 结果与分析

卧龙剖面所测得的磁化率数据见表 1。 χ_{lf} 变化范围为 $6.5 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg} \sim 22.4 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值 $13.50 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$, 变异系数 37.57%; χ_{hf} 的变化范围为 $6.2 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg} \sim 20.7 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值 $12.81 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$, 变异系数为 38.51%。

Table 1. Magnetic susceptibility data of Wolong profile
表 1. 卧龙剖面磁化率数据

序号	χ_{lf}	χ_{hf}	$\chi_{fd}(\%)$
Q5	13.17	12.31	6.56
Q4	21.85	20.74	5.08
Q3	22.38	20.12	10.07
Q2	13.15	12.55	4.59
Q1	13.65	12.40	9.22
WL1	11.34	10.12	10.79
WL2	16.84	16.18	3.93
WL3	15.60	14.56	6.67
WL4	8.87	8.01	9.77
WL5	17.49	16.46	5.90
WL6	20.73	20.36	1.79
WL7	7.18	6.48	9.74
WL8	6.90	6.43	6.81
WL9	8.33	7.42	10.92
WL10	6.49	6.17	4.88
WL11	19.45	18.73	3.68
WL12	18.93	18.88	0.25
WL13	9.82	8.80	10.36
WL14	8.82	8.60	2.47
WL15	17.57	17.42	0.87
WL16	15.07	14.87	1.33
WL17	15.64	15.31	2.10
WL18	6.89	6.75	2.00
WL19	7.87	7.87	0.00

卧龙剖面的低频磁化率和高频磁化率的变化趋势见图 3, 在曲线上表现为四个波峰和三个波谷。波峰出现在 WL2 号样(1.69 m)、WL6 号样(2.09 m)、WL12 号样(2.69 m)以及 WL15 号样(2.99 m), 对应的磁化率值分别为分别 $16.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $16.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $20.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $20.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $18.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $18.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 以及 $17.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $17.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。有三个明显的波谷, 分别出现在 WL4 号样(1.89 m)所测得的 $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $8.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、WL7 号样(2.19 m)所测得的 $7.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $6.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、WL13 号样(2.79 m)所测得的 $9.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $8.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

以 WL12 (2.69 m)位置处为分界线, 卧龙剖面上部 χ_{lf} 的平均值为 $14.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_{hf} 的平均值为 $13.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $\chi_{fd}(\%)$ 的平均值为 6.9%, 下部 χ_{lf} 平均值为 $12.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_{hf} 的平均值 $12.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $\chi_{fd}(\%)$ 的平均值为 2.4%。表明该风化壳下部的风化发育程度要弱于上部。

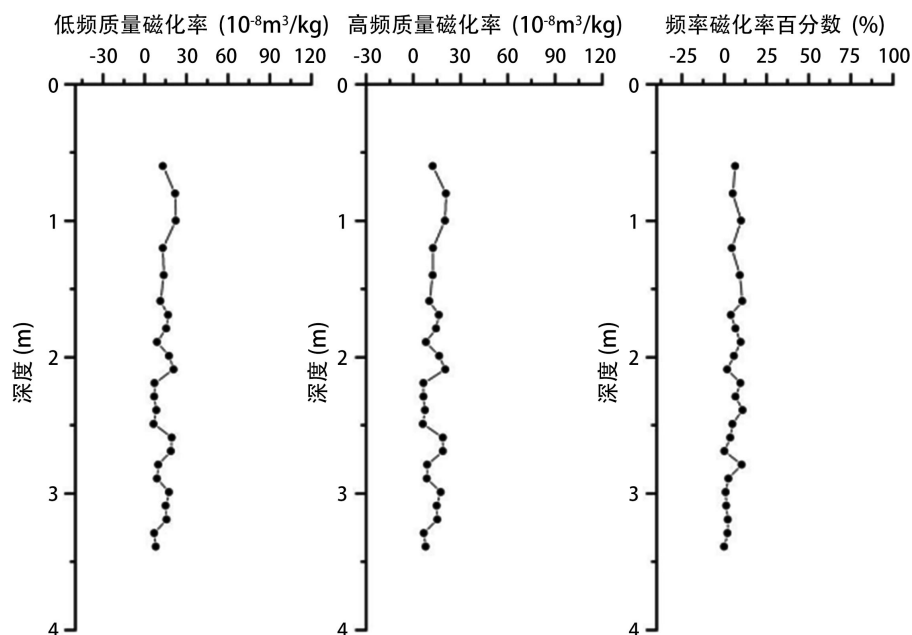


Figure 3. Change of magnetic susceptibility with depth in Wolong profile
图 3. 卧龙剖面磁化率变化曲线

χ_{fd} (%) 在风化成壤方面更具有指示意义[23], 卧龙剖面的 χ_{fd} (%) 随着深度的增加 χ_{fd} (%) 总体上有波动减小的趋势, χ_{fd} (%) 的变化范围在 0%~10.9% 之间, 平均值为 5.4%, 标准差为 3.6, χ_{fd} (%) 的最大值出现在 WL13 号样(2.79 m), 值为 10.4%。 χ_{fd} (%) 波动变化的趋势与前文粒度分析与化学元素分析相对应, 说明卧龙剖面风化壳在形成的过程中上部的发育程度要强于下部, 并且在形成的过程中气候在波动变化。

5. 讨论

5.1. 磁化率与粒度的关系

20 世纪 80 年代起, 吕厚远[24]和刘秀铭等[25]发现中国的黄土 - 古土壤磁化率具有明确的古气候意义, 之后黄土 - 古土壤磁化率的古气候意义在中亚、欧洲以及北美等地相继得到了证实。继而有学者将磁化率的应用范围扩大到红土沉积物的研究上, 但是根据前人的研究, 学者们对能否将磁化率的研究应用到红土沉积物上尚无定论: 杨浩等[26]通过对安徽宣城红土进行磁化率研究, 发现南方红土磁化率曲线的震荡模式与北方黄土 - 古土壤完全一致, 并将南方红土划分为 8 个沉积旋回, 代表 2~8 次大的气候旋回, 得出南方红土磁化率可以作为古气候变化的替代指标; 刘育燕等[27]对江西杨梅山红土剖面的研究发现南方红土浓度归一化磁化率有明确的古气候意义; 朱丽东等[28]对庐山红土磁化率的研究不仅的出磁化率有明确的古气候意义, 还能指示网纹红土发育期间水分条件的变化。但有些学者持有截然不同的观点, 黄镇国等[29]通过对江西、安徽两省红土磁化率的测定与研究, 发现其不能代表古气候的代用指标。本文所研究的对象为北方的红土, 其形成发育与南方红土存在一定的差异, 通过将所测得卧龙剖面的磁化率与粒度相结合, 探讨能否将磁化率做为红土所反映的气候替代指标的研究。

磁性指标与沉积物粒度的关系有可能反映了物质来源、沉积后期改造等环境要素的变化。根据卧龙剖面磁化率指标的变化特征, 对磁化率 - 粒度之间的相关性进行分析(见图 4)。结果显示: 沉积物中中值粒径与 χ_{lf} 、 χ_{fd} 和 χ_{fd} (%) 均表现为负相关, r 分别为 -0.18、-0.0627、-0.552, 表明磁性矿物多存在于较细的沉积物颗粒中。并且中值粒径与频率磁化率的相关关系不显著。

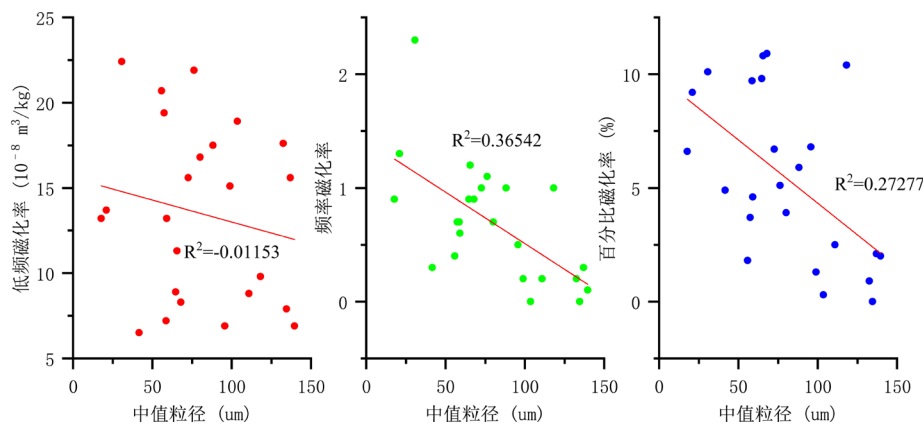


Figure 4. Relationship between magnetic proxies (χ_{lf} , χ_{fd} , χ_{fd} (%)) and median grain size of Wolong profile
图 4. 磁学参数(χ_{lf} , χ_{fd} , χ_{fd} (%))与中值粒径(M)散点图

环境磁学指标具有较好的一致性, 故以 χ_{lf} 为研究对象, 进一步探讨其与各粒径组分之间的关系(见图 5)。结果显示: χ_{lf} 与 <2 μm 的粘粒组分相关关系不显著, 与 2~63 μm 的粉砂组分呈正相关, 与 >63 μm 组分呈负相关, 指示了卧龙剖面沉积物中的磁性矿物可能主要富集于 2~63 μm 的粉砂组分中。

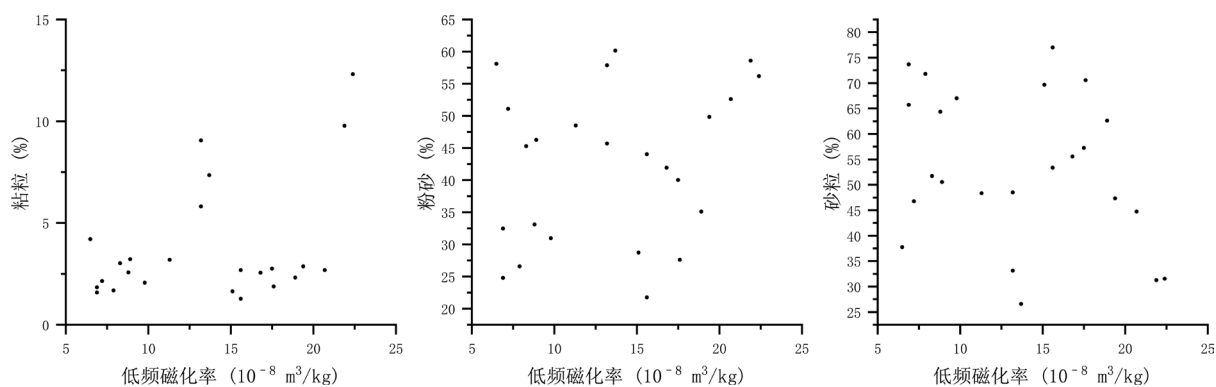


Figure 5. Relationship low-frequency mass susceptibility (χ_{lf}) and grain size of core of Wolong profile
图 5. 卧龙剖面低频磁化率(χ_{lf})与各粒径组分散点图

5.2. 磁化率反应的古气候过程

沉积物中磁性矿物的形成转化与气候环境密切相关, 磁化率的高低在一定程度上对沉积物形成环境有很好的响应。研究表明, 沉积物在还原条件下进行的早期成岩作用会使磁性矿物发生溶解和相变[30][31][32]并且和沉积物中的有机质含量密切相关。有机质的分解会消耗水体中的溶解氧, 形成还原环境, 使含铁矿物发生溶解和转化[33], 致使沉积物磁化率降低[34]。成土作用与降水量密切相关, 故磁化率可以揭示降水量的变化。频率磁化率(χ_{fd})是一种可以反映红土中是否存在介于稳定单畴(SSD)和超顺磁(SP)的过渡状态磁性颗粒的指标, 也可作为红土中 SP 颗粒浓度的度量指标之一。卧龙剖面红层 χ_{lf} (%)的平均值为 $14.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_{fd} (%)的平均值为 6.9%, 黄层 χ_{lf} 的平均值为 $12.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_{fd} (%)的平均值为 2.4%, 表明红土沉积时, 同时形成较多的次生超顺磁磁性矿物, 并且这与粒度组分含量有很好的对应关系。

卧龙剖面位于辽东半岛东部的波缓夷平面上, 属于出露地表, 由石灰岩风化而后堆积形成的红色风化壳。研究表明辽东半岛的构造条件以及地貌条件和山东半岛群岛近似, 在这种条件下所形成的红色风化壳也相似。前人研究出庙岛群岛的红色风化壳形成于晚第三纪, 因此, 辽东半岛的红色风化壳应该

也是在晚第三纪温暖、多雨的气候条件下发育形成。卧龙剖面上部有一明显的砾石层, 上部和下部颜色有明显区别, 所以初步推测下部风化壳红化时期可能因为降水增多, 碧流河改道, 使其处于还原环境, 中断了红化。辽南地区已经发现了多处红色风化壳, 与辽南现有的磁化率数据做对比发现, 即使是发育在温度高且降雨较多的相同气候条件下, 因为其区域环境、沉积成因的不同, 磁化率值也不尽相同。因此, 辽东半岛红色风化壳的磁化率值在一定程度上可以反映形成时期的古气候环境变化信息, 但是能否客观反映出沉积时期的古气候条件, 这与吉云平等[16]的研究结论一致。故磁化率数据能否成为反映古环境的替代指标还需要结合地质背景、化学元素、孢粉、粒度等指标去深入分析。

5.3. 辽东半岛红色古风化壳对比分析

对比分析辽东半岛已有的红色古风化壳的磁化率信息, 卧龙剖面的 χ_{fd} (%) 为 5.43, 甘井子区棋盘子村剖面为 14.4%、金州区龙王村剖面为 14.95%、七顶山剖面为 12.15%、华农村剖面为 11.53%、假日花园剖面为 11.85%、城山头剖面为 12.5%, 可以发现即使是发育在相同的温暖湿润的气候条件下的风化壳, 因为其母岩不同、沉积环境不同, 质量磁化率的值也存在差异。在以上七个剖面中, 卧龙剖面 χ_{fd} (%) 最低, 仅为 13.5, 说明卧龙古风化壳发育成熟度最低。卧龙剖面位于辽东半岛的最东端, 根据上文地球化学的分析结果, 辽东半岛东部风化壳的发育成熟度从西到东呈现逐渐升高的趋势, 这与磁化率的分析结果呈相反的趋势。风化壳磁化率的高低不仅与风化程度有关, 还会明显受形成时所处氧化还原环境的制约, 卧龙剖面的 χ_{fd} 仅为 $13.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 与其他剖面相差上百倍, 推测卧龙古风化壳的质量磁化率低可能是过量的水分和较高的温度氧化成为低磁性的赤铁矿, 也可能是氧化还原成为更低磁性的针铁矿或者是纤铁矿与沼铁矿所致。Ding *et al.* [35] [36] 经研究发现在水淹和还原环境下, 磁性矿物会遭到破坏, 根据前文分析, 该剖面在形成过程中氧化还原环境交替进行, 并且在在还原环境下的水分条件较好, 因此可以认为卧龙古风化壳质量磁化率值的反常是微环境水淹的结果(表 2)。

Table 2. Susceptibility comparison of weathering crust in Liaodong Peninsula

表 2. 辽东半岛风化壳磁化率对比

剖面名称	低频磁化率平均值($10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)	频率磁化率平均值(%)
甘井子区棋盘子村[37]	305.06	14.44
金州区龙王村[37]	473.26	14.95
七顶山剖面[23]	87.10	12.15
华农村剖面[23]	200	11.53
假日花园剖面[23]	116	11.85
城山头剖面[38]	236	12.50
卧龙剖面	13.50	5.43

6. 结论

卧龙剖面磁化率曲线整体呈现出波动变化的趋势, 频率磁化率百分数曲线从剖面顶部至底部呈现出波动减小的趋势; 磁化率与粒度的关系表明磁性矿物多存在于较细的沉积物颗粒中; 辽东半岛红色风化壳是在晚第三纪高温多雨且潮湿的古气候条件下形成的, 由此辽东半岛也经历了由湿热的晚第三纪季风型气候向半湿润半干旱的第四纪温暖气候以及干寒气候转变的趋势, 卧龙剖面在一定程度上可以反映沉积时古环境的变化信息, 但是能否作为指示古环境的替代指标还需要深入研究。

致谢

本文在投稿期中获得编辑部与审稿人的关键性修改意见, 在此向您们的支持和帮助由衷地表示感谢!

参考文献

- [1] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 193-209.
- [2] Hounslow, M.W. and Maher, B.A. (1999) Source of the Climate Signal Recorded by Magnetic Susceptibility Gvariations in Indian Ocean Sediments. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 5047-5061. <https://doi.org/10.1029/1998JB900085>
- [3] Stage, M. (2011) Magnetic Susceptibility as Carrier of a Climatic Signal in Chalk. *Earth & Planetary Science Letters*, **188**, 17-27. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00304-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00304-1)
- [4] Zheng, Y., Kissel, C., Zheng, H.B., *et al.* (2009) Sedimentation on the Inner Shelf of the East China Sea: Magnetic Properties, Diagenesis and Paleoclimate Implications. *Marine Geology*, **268**, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.10.009>
- [5] Xie, X. (2016) Asian Monsoon Variation over the Late Neogene-Early Quaternary Recorded by Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) from Chinese Loess. *Quaternary International*, **399**, 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.04.061>
- [6] Ellwood, B.B., Crick, R.E., Garcia-Alcalde, F., Jenaro, L., *et al.* (2001) Global Correlation Using Magnetic Susceptibility Data from Lower Devonian Rocks. *Geology*, **29**, 583. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0583:GCUMSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0583:GCUMSD>2.0.CO;2)
- [7] Crick, R.E., Ellwood, B.B., Hassani, A.E., *et al.* (1997) MagnetoSusceptibility Event and Cyclostratigraphy (MSEC) of the Eifelian-Givetian GSSP and Associated Boundary Sequences in North Africa and Europe. *Episodes*, **20**, 167-175. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1997/v20i3/004>
- [8] 郑妍. 东海陆架内泥质沉积的磁学特征及古环境意义[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2011.
- [9] Gudadhe, S.S., Sangode, S.J., Patil, S.K., *et al.* (2012) Pre- and Post-Monsoon Variations in the Magnetic Susceptibilities of Soils of Mumbai Metropolitan Region: Implications to Surface Redistribution of Urban Soils Loaded with Anthropogenic Particulates. *Environmental Earth Sciences*, **67**, 813-831. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1528-z>
- [10] 安芷生, 张培震, 王二七, 等. 中新世以来我国季风——干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 678-693.
- [11] Maher, B.A. (1988) Magnetic Properties of Modern Soils and Quaternary Loessic Paleosols: Paleoclimatic Implication. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **137**, 25-54. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00103-X)
- [12] Liu, Q.S., Jackson, M.J., Yu, Y.J., *et al.* (2004) Grain Size Distribution of Pedogenic Magnetic Particles in Chinese Loess/Paleosols. *Geophysical Research Letters*, **312**, 359-393. <https://doi.org/10.1029/2004GL021090>
- [13] Liu, Q.C., Deng, J. and Zhu, R. (2007) Review of Recent Developments in Mineral Magnetism of the Chinese Loess. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 368-385. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.08.004>
- [14] 吴文斌, 陈留勤, 丁婷, 等. 广丰盆地晚白垩世周田组红层沉积特征及古气候意义[J]. 沉积学报, 2020, 38(3): 485-496.
- [15] 邓成龙, 袁宝印, 胡守云, 等. 环境磁学某些研究进展评述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 93-101.
- [16] 吉云平. 不同类型沉积物中磁化率的解释[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京大学, 2007.
- [17] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1041-1048.
- [18] 段一明, 张戈, 贾赛君, 等. 辽宁盘锦荣兴港作业区 MT19 钻孔海洋沉积物粒度特征[J]. 地质学刊, 2019, 43(4): 632-638.
- [19] 崔之久, 李德文, 冯金良, 等. 夷平面研究的再评述[J]. 科学通报, 2001, 46(21): 1761-1768.
- [20] 冯金良, 崔之久, 朱立平. 高海拔山地碳酸盐岩风化壳的发育特征及其地貌意义[J]. 中国岩溶, 2002, 21(4): 239-244.
- [21] 冯金良, 崔之久, 朱立平, 等. 夷平面研究评述[J]. 山地学报, 2005, 23(1): 1-13.
- [22] 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 100-143.
- [23] 金书晨, 李永化, 魏东岚. 辽南地区红色风化壳磁化率研究及古气候意义[J]. 云南地理环境研究, 2018, 30(2): 60-65.
- [24] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学(B 辑 化学 生命科学 地

- 学), 1994(12): 1290-1297.
- [25] 刘秀铭, 刘东升. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 1993, 13(3): 281-287.
- [26] 杨浩, 夏应菲, 赵其国, 等. 红土系列剖面的磁化率特征与古气候冷暖变换[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 195-200.
- [27] 刘育燕, 林文姣, 朱宗敏, 等. 南方红土中的磁极倒转以及磁化率变动记录[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 33-36.
- [28] 朱丽东, 姜永见, 张明强, 等. 庐山 JL 剖面红土磁化率特征及古环境记录[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 385-394.
- [29] 黄镇国, 张伟强. 中国红土期气候期构造期的耦合[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 200-208.
- [30] Canfield, D.E. and Berner, R.A. (1987) Dissolution and Pyritization of Magnetite in Anoxic Marine Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 645-659. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90076-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90076-7)
- [31] Karlin, R. and Levi, S. (1983) Diagenesis of Magnetic Minerals in Recent Hemipelagic Sediments. *Nature*, **303**, 327-330. <https://doi.org/10.1038/303327a0>
- [32] 刘健. 磁性矿物还原成岩作用述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 103-107.
- [33] Rowan, C.J., Roberts, A.P. and Broadbent, T. (2009) Reductive Diagenesis, Magnetite Dissolution, Greigite Growth and Paleomagnetic Smoothing in Marine Sediments: A New View. *Earth & Planetary Science Letters*, **277**, 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.10.016>
- [34] 梅西, 张训华, 王中波, 等. 南黄海北部 DLC70-3 孔沉积物磁化率特征及其对古冷水团的指示[J]. 地质科技情报, 2014, 33(5): 100-105.
- [35] Ding, Z.L., Rutter, N.W., Sun, J.M., *et al.* (2000) Re-Arrangement of Atmospheric Circulation at about 2.6 Ma over Northern China: Evidence from Grain Size Records of Loess-Palaeosol and Red Clay Sequences. *Quaternary Science Reviews*, **19**, 547-558. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00017-7)
- [36] Ding, R.W., Rowan, J.S., Jenkins, P.A., *et al.* (2001) A Multi-Method Study of Bedload Provenance and Pathways in an Estuarine Channel. *Physics and Chemistry of the Earth*, **26**, 747-752. [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(01\)00080-0](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00080-0)
- [37] 伏捷, 李永化, 张华, 等. 辽东半岛晚新生代沉积物磁化率特征及初步解释[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 135-141.
- [38] 秦浦. 大连城山头滨海红色风化壳发育特征研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2019.